

DISEÑO DE UN ACELERÓMETRO PARA MONITOREO SÍSMICO

Jorge Rodolfo Santalucía Ríos

Instituto de Investigaciones Antisísmicas, Universidad Nacional de San Juan Argentina

jrsanta@unsj.edu.ar

Leonardo Gastón Montero Flores

Instituto de Investigaciones Antisísmicas, Universidad Nacional de San Juan Argentina

leomontero2004@yahoo.com.ar

Resumen

El Instituto de Investigaciones Antisísmicas” (IDIA) tiene entre sus objetivos el análisis del efecto que produce un evento sísmico en las construcciones (Ingeniería Sismo Resistente). Si bien en el mercado mundial existen instrumentos apropiados, resulta de interés institucional disponer de moderno instrumental de diseño propio y bajo costo que contribuya al logro de este objetivo. El presente trabajo describe los avances logrados en el desarrollo de un Proyecto de Investigación, cuyo propósito es el diseño y construcción de un acelerómetro para monitorear, detectar y registrar la actividad sísmica local. Además, este acelerómetro constituye la base principal para ser usado en una red de sensores inalámbricos para monitoreo sísmico de estructuras, vinculándolos con transceptores RF de bajo costo y con la posibilidad de acceso a Internet.

Palabras Claves: Acelerómetro, memoria SD, microcontrolador, RF.

1. Introducción

Los eventos sísmicos se han convertido en los últimos años en uno de los fenómenos naturales destructivos más frecuentes y, a pesar de grandes esfuerzos de investigación realizados por la comunidad sismológica mundial

durante años, aún no se ha logrado avanzar con rigor científico en el campo de la predicción de terremotos [1].

Prácticamente todos los países tienen organismos específicos que administran una red de acelerómetros de banda ancha para registrar y estudiar la actividad sísmica regional, generalmente complementados por “Sistemas de Alerta Temprana” con el propósito de proteger a la población y mitigar los daños provocados por esos fenómenos.

Entre estos Organismos podemos citar al Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) en Argentina [1], Sistema Sismológico Nacional en México [2] y Centro Sismológico Nacional en Chile [3] entre los más destacados.

Una Red Sismológica Nacional consiste en un sistema de estaciones sismológicas instrumentadas con acelerómetros de gran rango dinámico (y elevado costo) ubicadas estratégicamente en su territorio, que registra los movimientos sísmicos y transmite vía satélite la información a un moderno centro de computación de datos. Con esta red se dispone de manera casi instantánea el lugar donde ha ocurrido un sismo, su magnitud y profundidad, y provee importante información para conocer las características geológicas de la región [3].

Por otra parte, en los últimos años se ha generado gran interés por la instrumentación de estructuras (edificios, puentes, etc) para conocer su comportamiento dinámico [4].

Este monitoreo en tiempo real permite detectar cambios en las características dinámicas de la estructura y, en consecuencia, identificar los daños producidos luego de un evento sísmico mediante el análisis de los registros de aceleración, ya que generalmente los daños están asociados a cambios en la frecuencia natural de la estructura [5].

Los datos adquiridos son de gran utilidad en la investigación de los efectos de los terremotos sobre las estructuras, cuyos resultados permiten mejorar el diseño de normas de construcción sismo-resistente.

Los avances tecnológicos en el desarrollo de sensores de aceleración, digitalizadores, procesadores y redes de comunicación inalámbrica, han

permitido el desarrollo de sistemas de bajo costo para monitoreo de estructuras [6, 7], por lo que paulatinamente se están instrumentando mayor cantidad de edificios en zonas de elevado riesgo sísmico,

La ciudad de San Juan, Argentina, se encuentra ubicada en una zona de intensa actividad sísmica, y fue destruida en 1944 por un terremoto de gran magnitud.

El “Instituto de Investigaciones Antisísmicas” (IDIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan tiene entre sus objetivos el análisis del efecto que produce un evento sísmico en las construcciones, por lo que es necesario disponer de instrumental de bajo costo apropiado para realizar monitoreo de la actividad sísmica local, y para estudiar el comportamiento de estructuras civiles ante la ocurrencia de un sismo.

El presente trabajo describe el desarrollo realizado en el IDIA de un acelerómetro para registro de movimientos sísmicos fuertes, que además pueden configurar una red de sensores sísmicos vinculados en forma inalámbrica (Wireless Sensor Network) [8].

Los sensores utilizados para el monitoreo sísmico son sensores de aceleración de tecnología MEMS [9], capacitivos, de bajo nivel de ruido y salida analógica, adosados a conversores ADC delta sigma de 24 bits.

La vinculación en red se realiza con transceptores RF de bajo costo. El sistema tiene la capacidad de acceso a Internet vía módem GSM/GPRS.

2. Acelerómetro para movimientos fuertes

El acelerómetro está compuesto por diversos componentes que se irán describiendo (figura1).

Se utiliza como elemento sensor el acelerómetro triaxial Kionix KXR94-2283 [10], fabricado con tecnología MEMS (Microelectromechanical Systems), de alta sensibilidad y bajo ruido 45 ug/sqrt(Hz), que se puede calibrar estáticamente por gravedad y presenta un excelente desempeño en cuanto a bajo ruido, baja sensibilidad cruzada entre ejes y alta estabilidad ante variaciones térmicas en el segmento de acelerómetros MEMS de bajo costo [11, 12].

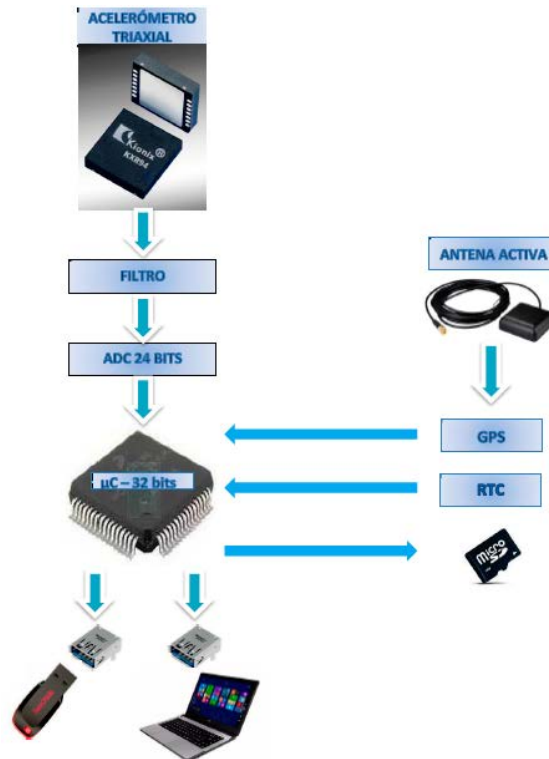


Figura 1 Esquema del Acelerómetro.

Las salidas analógicas del acelerómetro son filtradas y conectadas a un conversor analógico-digital delta-sigma de 24 bits (ADS1247) [13], controlado por un microcontrolador de 32 bits (MCF51JM128) [14] por medio del protocolo serie SPI.

El microcontrolador es la parte principal del sistema implementado. Además del control del conversor analógico-digital, controla la escritura de los datos de interés en una memoria tipo micro SD, normalmente de 2Gb, controla la configuración y lectura de datos de un módulo GPS externo, controla la comunicación con computadora externa mediante protocolo USB, y principalmente implementa un algoritmo inteligente de detección de sismos tal como se detalla en el próximo punto.

El acelerómetro se puede configurar por medio de un software instalado en la PC que se comunica por USB. La interface gráfica en PC permite configurar los principales parámetros del sistema, tales como tiempo de pre-evento, tiempo de post-evento, frecuencia de muestreo, valores de detección de umbral de disparo,

entre otros parámetros. Estos datos son almacenados en un archivo de configuración en la memoria SD, del cual el microcontrolador lee y ajusta sus parámetros de configuración.

La sincronización del sistema se puede programar para realizarla mediante un módulo GPS con antena activa que permite obtener con precisión la fecha y hora, o mediante un reloj de tiempo real (RTC) interno para ser usado en lugares donde no se reciba señal satelital del GPS (por ejemplo en túneles).

Este conjunto de componentes se encuentra alojado en un gabinete de aluminio reforzado, hermético y resistente a condiciones atmosféricas desfavorables (figura 2).



Figura 2 Acelerómetro.

3. Algoritmo de detección de sismos

Existen diversos algoritmos de detección de eventos sísmicos. En este sistema se han implementado dos algoritmos: uno realiza la detección por nivel absoluto y otro se basa en el algoritmo de la relación entre el promedio de tiempo corto y el promedio de tiempo largo, conocido por las siglas en inglés STA/LTA (Short Time Average / Long Time Average).

El algoritmo de nivel absoluto es el más simple de implementar y se basa en iniciar el registro en memoria SD de las señales de aceleración una vez que se haya superado un nivel de umbral preestablecido. La desventaja de su utilización es que para señales sísmicas de baja intensidad, estas son enmascaradas por el ruido de fondo de origen humano o sísmico natural, por lo que este algoritmo es de utilidad solamente para movimientos sísmicos fuertes.

Un algoritmo más apropiado para la detección de eventos sísmicos es el algoritmo STA/LTA [15], cuya representación gráfica se observa a continuación (figura 3). En este algoritmo se calcula continuamente la media del valor absoluto de las señales de aceleración en dos ventanas de tiempo móviles.

La ventana del promedio de tiempo corto (STA) es sensible a los eventos sísmicos, mientras que la ventana de promedio de tiempo largo (LTA) brinda información sobre el ruido sísmico de fondo presente en el lugar de emplazamiento del sensor de aceleración.

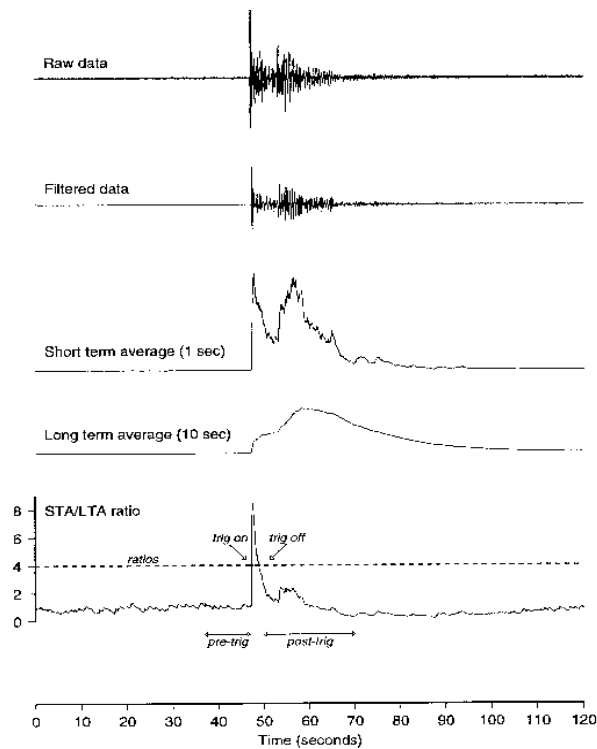


Figura 3 Detalle del algoritmo de detección STA/LTA.

De este modo, cuando la relación entre STA y LTA supera un valor preestablecido, configurable por el usuario, se declara la condición de evento sísmico en curso y se comienza el registro de las señales de aceleración en memoria SD, desde el tiempo de pre-evento establecido en la configuración del sistema.

Las señales provenientes de los sensores de aceleración se almacenan temporalmente en una memoria SRAM en forma cíclica, por medio de un buffer

circular. En cualquiera de los dos algoritmos descritos, una vez detectado el evento sísmico los datos que se almacenan en la memoria permanente, memoria SD, no son los datos de aceleración del momento de la detección, sino que se van almacenando los datos del buffer circular en la memoria SRAM.

Esto permite registrar los datos instantes antes de la detección del evento (tiempo de pre-evento, configurable por el usuario), por lo que se dispone información del sismo desde su inicio. Del mismo modo, desde el momento que se deja de detectar el sismo se registran los datos por un determinado tiempo adicional (tiempo de post-evento), que también es configurable por el usuario.

4. Acelerómetros conectados en red

El acelerómetro descrito para monitoreo sísmico, con la incorporación de módulos transceptores RF, se puede usar para implementar una red de sensores sísmicos inalámbrica (Wireless Sensor Network (WSN) [8]), con la capacidad de acceso a Internet vía módem GSM/GPRS (figura 4).

Un sistema de estas características es muy útil para monitorear el comportamiento de una estructura (por ejemplo de un edificio) ante la ocurrencia de un evento sísmico.

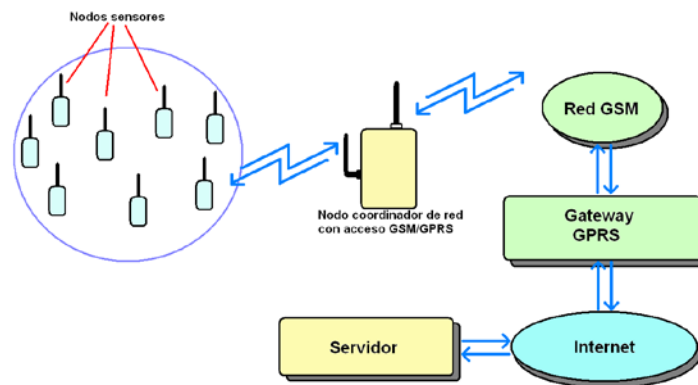


Figura 4 Esquema del sistema de red inalámbrica.

En este tipo de redes son muy importantes factores tales como disminución del consumo energético, escalabilidad, robustez frente a pérdida de parte de la red, como así también el bajo costo de los nodos que constituyen la WSN.

La red está compuesta por dos clases de nodos: nodos sensores con transceptores RF de bajo costo, y nodo coordinador de red RF con módulo GSM/GPRS incorporado.

Para el nodo sensor, a la arquitectura descrita anteriormente del acelerómetro se le agrega un módulo de radiofrecuencia, económico y de altas prestaciones. El módulo seleccionado para esta aplicación es el nRF24L01 [16], quien es el encargado de transmitir en forma inalámbrica los datos registrados al nodo coordinador de red.

Este módulo de radiofrecuencia cuenta con una antena externa y amplificador de RF incorporado, con una distancia de transmisión máxima de aproximadamente 800 metros a campo abierto y 200 metros en interiores con paredes de materiales de construcción en seco, a una tasa de transmisión de 250 Kbps. El sistema se alimenta con una batería de litio-ion.

Se pueden utilizar en gran número, en topologías de red en estrella y malla (mesh) [17], y su diseño es resistente debido a que en ciertas aplicaciones (por ejemplo, medición en un puente) puede ser expuesto a condiciones ambientales adversas como lluvia, viento, radiación solar, etc.

El nodo coordinador de red RF con módulo GSM/GPRS incorporado está destinado a la coordinación de la red de sensores RF, solicitar la toma de muestras de cada nodo sensor, recibir los datos enviados por estos nodos, procesarlos y transmitirlos a un servidor remoto de Internet mediante el uso de la red de datos GPRS.

Además del módulo RF (nRF24L01) encargado de enviar y recibir datos de los nodos sensores, el nodo coordinador de red también está constituido por un módem GSM/GPRS con la capacidad de conectarse a Internet en forma inalámbrica. El módulo para esta función es el módulo Quectel M95 [18], que cuenta con pila de protocolos TCP/IP, UDP/IP, HTTP y FTP integradas, y que puede configurarse y controlarse mediante comandos AT por interface serie. Este módulo incluye un chip telefónico tipo SIM y una antena externa con conector SMA.

También está previsto incorporar una interface por fibra óptica de plástico [19], ya que es sumamente útil en aplicaciones industriales donde deben colectarse datos en ambientes con riesgo de explosión o expuestos a interferencia electromagnética. Esta interface está compuesta por módulos de Tx/Rx ópticos de bajo costo [20], atendiendo a la premisa general del sistema de minimizar los costos para una adopción masiva.

Como fuente de alimentación para este nodo se cuenta con una batería de alto rendimiento y con una buena relación peso/carga, del tipo Litio-Ion con más de 4000 mAh. Para realizar la carga de la misma se ha incluido un circuito integrado de carga específico, que respeta el perfil de carga exigido para este tipo de baterías.

La carga de la batería puede provenir de una fuente externa o a través del puerto USB incorporado en el módulo.

5. Funcionamiento de la Red

Los nodos sensores se colocan en diversos puntos estratégicos de una construcción civil tal como un edificio, un puente, etc. Cada nodo puede contar, además del suministro de energía de la batería, con alimentación de la red o de un pequeño panel solar en caso de no contar con suministro eléctrico en el lugar de instalación. Cada nodo sensor recibe una señal de sincronismo cada segundo desde el nodo coordinador, que cuenta con un módulo GPS para obtención de fecha y hora precisa.

El sistema puede funcionar de dos formas distintas: una es utilizada para análisis estructural y permite registrar continuamente las señales de vibración en diversos puntos de la edificación durante un lapso de tiempo preestablecido.

La otra forma de funcionamiento permite registrar eventos sísmicos detectados por el algoritmo seleccionado (umbral o relación STA/LTA). Los nodos analizan continuamente las señales provenientes de los acelerómetros hasta que se detecta un evento sísmico, y a partir de ese momento se registran los datos provenientes de todos los sensores en la memoria SD, adicionando los datos de

pre-evento almacenados en el buffer circular implementado en memoria SRAM (tal como se explicó anteriormente).

El nodo que detecte primero el evento sísmico será el encargado de informar esta condición al nodo coordinador, quien retransmitirá esta señal a los demás nodos para que comiencen a registrar también el evento.

De esta forma se puede determinar cómo reaccionaron las diversas partes de la estructura de la edificación ante el evento sísmico, permitiendo tomar medidas de mejora estructural si la respuesta de la edificación no corresponde con los resultados esperados para el modelo matemático del mismo.

Una vez pasado el evento sísmico se tendrán los datos del mismo archivados en memoria SD, en un archivo de valores separados por coma (CSV) (figura 5).

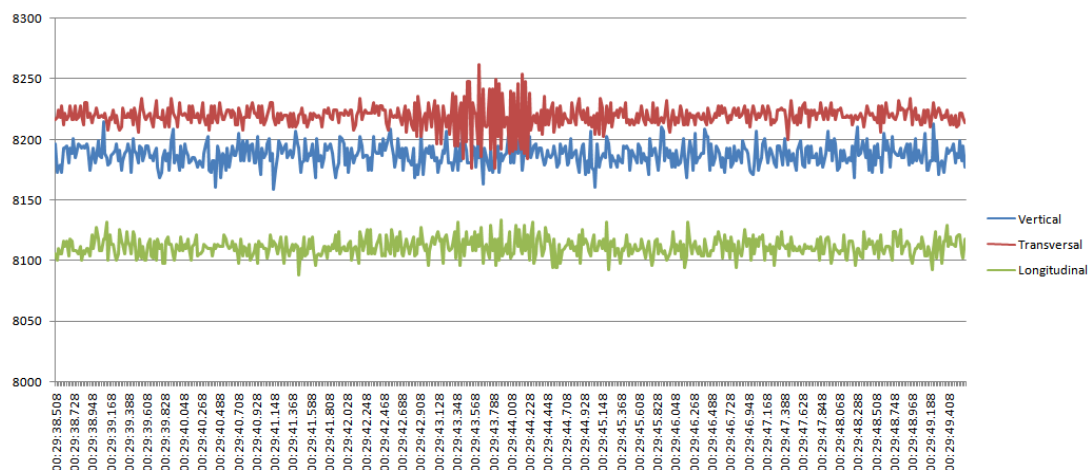


Figura 5 Registro sísmico en formato CSV.

Los parámetros del sistema para cada uno de los nodos se pueden configurar por software desde el nodo coordinador a través de su puerto USB y una interface gráfica (figura 6), o desde internet vía página web. Los parámetros que pueden configurarse son: tasa de muestreo, algoritmo de detección de sismo, tiempo de pre-evento, tiempo de post-evento, modo de funcionamiento (continuo o por evento), enumeración de nodos activos, etc.

El módulo GSM/GPRS utilizado cuenta con pilas de software para su uso en redes de paquetes de datos tales como TCP/IP y UDP/IP. Para la red de sensores descrita en este trabajo se ha utilizado el protocolo UDP/IP para la recepción en tiempo real de datos provenientes de los sensores de aceleración.

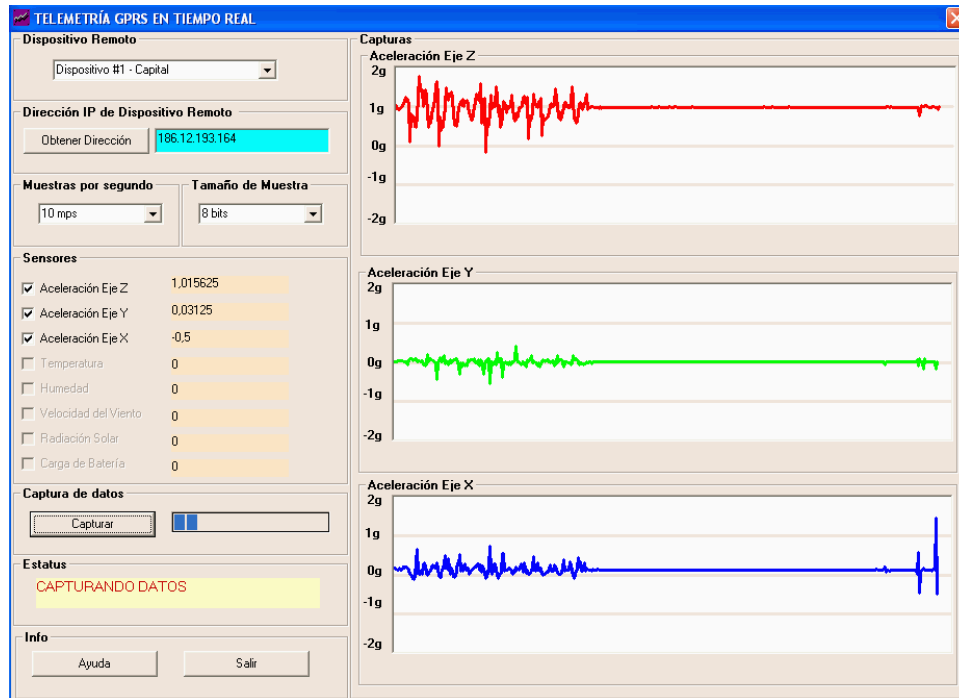


Figura 6 Interface gráfica con recepción de datos en tiempo real.

6. Procesamiento de los datos en Servidor Remoto

Los datos de monitoreo sísmico provenientes de la red de sensores inalámbricos se envían vía GSM/GPRS a un servidor remoto en la forma de archivos de datos con extensión CSV (Comma Separated Values o Valores Separados por Comas). Una vez almacenados en el servidor se procede automáticamente a cargar estos datos en tablas de una base de datos MySQL. Para visualizar o analizar los datos cargados en la base de datos se utilizan scripts programados en lenguaje PHP que se encargan de generar páginas web dinámicas con tablas, resultados de procesamiento sobre los datos y las gráficas correspondientes (figura 7).

7. Conclusiones

Si bien el Proyecto de Investigación se encuentra en desarrollo, con el prototipo construido se han realizado pruebas de funcionamiento en el edificio del Instituto de Investigaciones Antisísmicas obteniendo resultados satisfactorios para los objetivos propuestos.

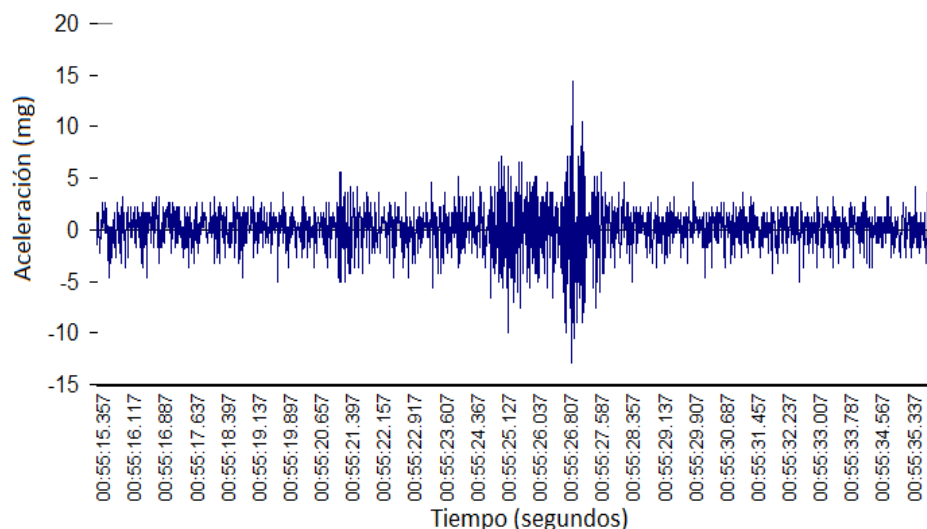


Figura 7 Gráfica dinámica en servidor web.

En la aplicación como acelerómetro independiente para monitoreo de la actividad sísmica se ha logrado registrar, entre otros sismos, varias réplicas del terremoto ocurrido el 16/09/2015 en la región de Los Vilos, Chile, con epicentro aproximadamente a 300 km de la ciudad de San Juan (figura 8, 9 y 10).

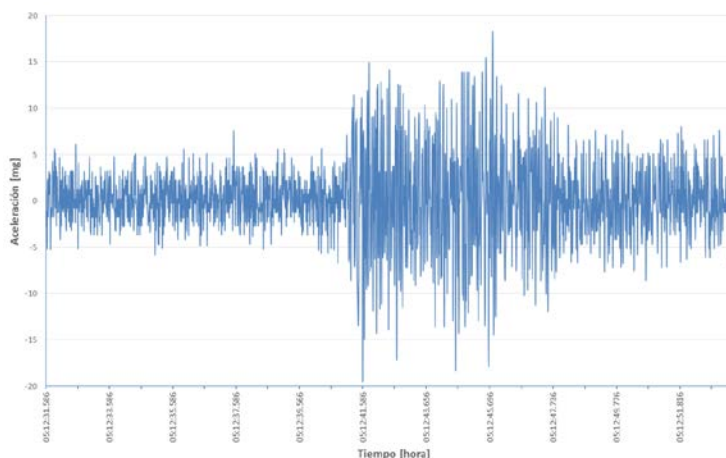


Figura 8 Registro 17/09/2015 – Componente Vertical.

Para las pruebas de funcionamiento en red, tres nodos sensores fueron dispuestos en topología estrella en una planta del edificio, fijados firmemente a la estructura mediante anclaje con tornillos. El objetivo del sistema fue recibir información relativa a las vibraciones a las que estaba sometido el edificio en cada uno de los puntos monitoreados, en forma inalámbrica.

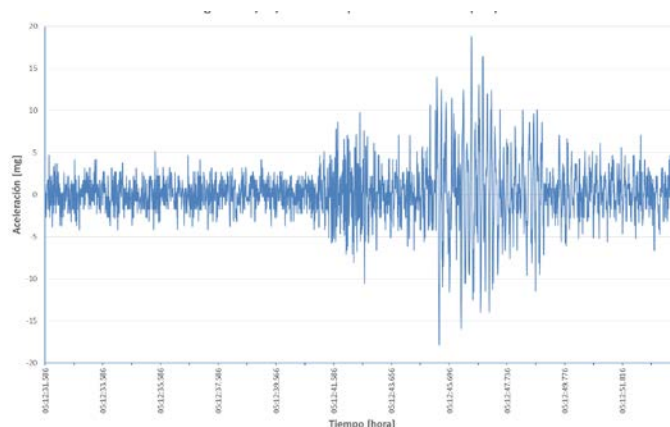


Figura 9 Registro 17/09/2015 – Componente Transversal (N-S).

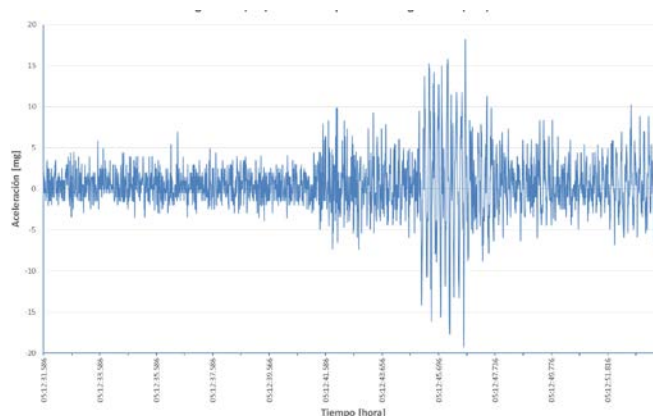


Figura 10 Registro 17/09/2015 – Componente Longitudinal (E-O).

8. Bibliografía y Referencias

- [1] Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES). www.inpres.gov.ar.
- [2] Servicio Sismológico Nacional, UNAM. www.ssn.unam.mx.
- [3] Centro Sismológico Nacional, Univ. de Chile. www.sismologia.cl.
- [4] Earthquake Monitoring of Structures, USGS. <http://earthquake.usgs.gov/monitoring/buildings>.
- [5] E. Safak, K. Hudnut, "Real-time structural monitoring and damage detection by acceleration and gps sensors". 8th US National Conference on Earthquake Engineering San Francisco, California. 2006. Pág. 10.
- [6] R. Boroschek, C. Poblete, "Sistema automático de monitoreo de eventos y movimiento fuerte". XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2015. Paper N° 176. 2015. Pág. 12.

- [7] L. M. Rodriguez Peralta, E. I. Hernandez. "Sistema de monitoreo estructural de bajo costo basado en redes de sensores inalámbricos". XI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. 2014. Pág. 16.
- [8] SuraiyaTarannum, "Wireless Sensor Networks", Ed. Croacia: InTech, 2011.
- [9] J. F. Lawrence, E. S. Cochran. "Rapid earthquake characterization using MEMS accelerometers". Bulletin of Seismological Society of América, Vol 104, N° 1, 2014, pág.184-192
- [10] KXR94-2283 - $\pm 2g$ Tri-axis Accelerometer Specifications. Kionix. 2014
- [11] René Rail-Ip, Evaluation of Low-Cost MEMS Accelerometers and Investigation of Inertial Algorithms for Dead Reckoning in Railway Environment. 2014. University of Toronto, Toronto, Canadá.
- [12] J. R. Evans, R. M. Allen, "Perfomance of several low-cost accelerometers". Seismological Research Letters. Vol 85. N° 1. 2014. Pp. 147-158.
- [13] ADS1247 - 24-Bit Analog-to-Digital Converters. Texas Instruments. USA.
- [14] MCF51JM128 ColdFire Integrated Microcontroller Reference Manual. Freescale Semiconductor. Texas, USA. 2009.
- [15] A. Trnkoczy, Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. - In: Bormann, P. (Ed.), New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2), Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. 2012.
- [16] nRF24L01 Single Chip 2.4GHz Transceiver Preliminary Product Specification. Nordic Semiconductor ASA. Noruega. 2008.
- [17] N. Funabiki, Wireless Mesh Networks. 2011. Ed. InTech. Croacia.
- [18] M95 Hardware Design. Quectel Wireless Solutions Co.,Ltd. Shanghai, China. 2012.
- [19] A. Weiner, Plastic Fiber Optics. Siemens. 2003.
- [20] HFBR-0500Z Series Datasheet. AVAGO Technologies. California, USA. 2011.

9. Autores

Ing. Jorge Rodolfo Santalucía – Ingeniero Electricista Electrónico, Universidad Nacional de Córdoba, 1980 – Especialista en Docencia Universitaria, Universidad Nacional de San Juan, 2001.

Ing. Leonardo Gastón Montero Flores, Ingeniero Electrónico, Universidad Nacional de San Juan, 2014.